





## Mecanismos de ruptura na análise experimental de lajes alveolares protendidas considerando a variação da altura

Rupture mechanisms in the experimental analysis of prestressed hollow core slabs considering height variation

Luis Fernando Borzi Bazilio<sup>1</sup> , Luiz Carlos Alvarenga Junior<sup>1</sup> ,  
Bruna Catoia<sup>1</sup> , Marcelo de Araujo Ferreira<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto. Rod. Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, Brasil.

e-mail: luisbazilio@hotmail.com, luiz.alvarengajr@outlook.com, bcatoia@ufscar.br, marceloaferrera@uol.com.br

### RESUMO

As primeiras lajes alveolares foram produzidas em meados de 1950 na Finlândia, sendo a seção transversal composta por alvéolos circulares de 150, 200 ou 265 mm de altura. Na década de 80, seções de alvéolos não circulares tornaram-se populares, com seções mais altas de 320, 370, 400 e 500 mm. O presente trabalho é uma continuidade dos estudos em pisos pré-moldados realizados pelo Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto (NETPre), e tem como objetivo analisar os mecanismos de ruptura de lajes alveolares protendidas submetidas a esforços cortantes com ênfase no estudo comparativo da variação da altura das lajes (lajes altas e baixas). Neste trabalho foram analisados ensaios destrutivos realizados de acordo com a EN1168 em 06 protótipos de lajes (03 com altura de 200 mm e 03 com altura de 300 mm) com 6 m de comprimento cada, com aplicação de uma carga concentrada até a ruptura para avaliação da resistência à força cortante última. A partir das análises dos mecanismos resistentes concluiu-se que as lajes de 200 mm apresentaram maior influência do mecanismo de flexão o que resultou em maior deformabilidade do elemento para valores menores de força em comparação com as lajes mais altas. No caso das lajes de 300 mm o mecanismo de ruptura quanto ao cisalhamento foi bem definido com ruptura brusca e aparecimento de fissura inclinada típica com extensão do apoio ao ponto de aplicação da força. Além disso, analisando os resultados e comportamento das peças próximo a ruína, pode-se concluir que tanto as lajes de 300 mm como as de 200 mm apresentaram boa eficiência de ancoragem. O escorregamento das cordoalhas somente ocorreu após a ruptura por cisalhamento em região fissurada por flexão de acordo com o critério de cálculo adotado na NBR14861.

**Palavras-chave:** Laje alveolar; Cisalhamento; Mecanismo de ruptura.

### ABSTRACT

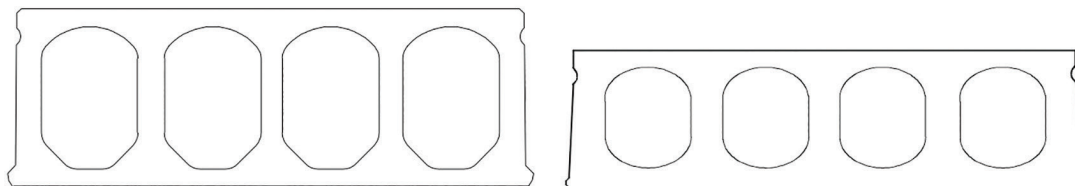
The first's hollow-core slabs were produced by 1950 in Finland and had circular cross section of 150, 200 or 265 mm height. By 80's, non-circular hollow core slabs became popular in 320, 370, 400 and 500 mm height. This work is a continuity of precast floors studies done by Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto (NETPre), and aims to analyze the rupture mechanisms of prestressed hollow core slabs subjected to shear tension with an emphasis on comparative study in variation of height in slabs (high and low height slabs). In this work, destructive tests carried out according to EN1168 were analyzed in 06 slab prototypes (3 with 200 mm height and 3 with 300 mm height) with 6 m length each, with the application of a concentrated load until the rupture for evaluation of resistance to ultimate shear force. From the analysis of the resistant mechanisms it was concluded that 200 mm slabs presented greater influence of flexural mechanism which resulted in a larger deformability of the element for lower values of applied force in comparison with the higher slabs. In the case of 300 mm slabs, the rupture mechanism of shear tension was defined as sudden rupture and the appearance of a typical inclined crack with extension from the support to the point of application of the load. In addition, with the behavior and results that slabs showed near the ruin point, it can be concluded that both 300 mm and 200 mm slabs presented good anchoring efficiency. The slipping of the strings occurred only after the shear rupture in flexural-fissured region according to the calculation criteria adopted in NBR14861.

**Keywords:** Hollow-core slab; Shear tension; Rupture mechanism.

## 1. INTRODUÇÃO

Lajes alveolares protendidas estão entre os produtos pré-fabricados mais antigos, sendo as primeiras unidades desenvolvidas em meados de 1950, período em que houve o desenvolvimento da técnica de protensão em longas pistas [1].

De acordo com [2], as primeiras unidades de lajes alveolares na Finlândia possuíam 150, 200 ou 265 mm de altura. Todas as geometrias eram fornecidas com alvéolos circulares. A partir da década de 80 gradativamente seções transversais com alvéolos não circulares foram tornando-se populares, iniciando pelas lajes de 400 mm de espessura e posteriormente passando para lajes de 320, 370 e 500 mm. Logo na Figura 1 é possível observar a seção transversal dessas lajes. Ainda segundo [2], foi constatado que a falha por cisalhamento nestas lajes mais altas e com alvéolos não circulares era consideravelmente menor que o método apresentado pela FIP 88 [3], sendo então proposto um novo método, para corrigir esta diferença.



**Figura 1:** Seção de lajes com alvéolos não circulares.  
Fonte: [1].

Com base no trabalho realizado por [4] foi desenvolvida a expressão para resistência ao cisalhamento apresentada nas Recomendações da FIP. Os pesquisadores observaram uma redução na resistência ao cisalhamento quando alvéolos não eram circulares. Tal efeito foi explicado na teoria das probabilidades. Pois em alvéolos circulares, a falha ocorre na alma na seção mais estreita. Já em lajes com alvéolos não circulares, a tensão de tração é praticamente constante sobre uma área na direção vertical, acarretando em uma falha com cargas mais baixas. Também foi proposto que a resistência à tração do concreto não é a mesma em todas as partes da seção transversal da laje e a resistência à tração também varia de uma seção para outra.

O presente trabalho é uma continuidade dos estudos em elementos para pisos pré-moldados (lajes alveolares) que vem sendo realizados pelo Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto (NETPre), e tem como objetivo principal analisar os mecanismos de ruptura de lajes alveolares protendidas com alvéolos não circulares submetidas a esforços cortantes com ênfase no estudo comparativo de lajes altas (altura de 30 cm) e baixas (altura de 20 cm).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir serão descritos os principais mecanismos de funcionamento próximo ao colapso para lajes alveolares submetidas ao cisalhamento e as principais pesquisas relacionadas ao tema.

### 2.1. Mecanismos de ruptura em lajes alveolares protendidas

#### 2.1.1. Flexo-cortante

O mecanismo de flexo-cortante é influenciado por inúmeros fatores, dentre eles podemos citar a resistência à tração do concreto, a taxa de armadura longitudinal, fator escala, o esforço axial da protensão e o tipo de agregado. Como mencionado em [5], os quatro primeiros fatores que influenciam o mecanismo da flexo-cortante estão presentes nas formulações apresentadas pelas equações das normas brasileiras: NBR 14861 e a NBR 6118, como ilustrado na Figura 2.

$$V_{Rd1} = \underbrace{0,25 f_{ctd}}_{\text{Resistência à tração}} \underbrace{(1,6 - d)(1,2 + 40\rho)}_{\text{Taxa de armadura longitudinal}} \underbrace{bd}_{\text{Fator escala}} + \underbrace{0,15 \sigma_{cp}}_{\text{Influência do esforço axial}} bd$$

**Figura 2:** Fatores que influenciam a flexo-cortante na equação brasileira.  
Fonte: [5].



**Figura 3:** Mecanismos de comportamento das lajes de 200 mm  
Fonte: [1].

A partir da vasta análise experimental desenvolvida em sua pesquisa, [1] constatou que lajes de 20 cm, com nível de protensão variando entre 1140 MPa a 1460 MPa, submetidas a uma força a 2,5 h do apoio, tendiam a se comportar de acordo com a Figura 3.

De acordo com [1], inicialmente ocorre o aparecimento de uma fissura de flexão na região onde a tensão de tração na fibra inferior atinge a resistência do concreto à tração. A formação de uma fissura proporciona um súbito aumento da força de tração na armadura pois as tensões de tração na seção transversal do concreto não fissurado acabam atravessando a fissura por meio da armadura. Assim, essa força adicional na armadura precisa ser totalmente ancorada para evitar uma falha brusca na formação da fissura. Dessa forma, com uma tensão de tração adicional nas nervuras devida ao cisalhamento, a fissura de flexão resulta em uma típica fissura inclinada de cisalhamento com flexão, resultando em um aumento da força na armadura.

Um menor ângulo entre a fissura inclinada e o eixo da laje resulta em um aumento adicional da força na armadura, assim como em um aumento das fissuras de flexão na borda inferior. Devido ao fato de as barras não serem totalmente ancoradas no apoio (região do comprimento de transferência, onde a força de protensão não foi totalmente transferida ao concreto), a capacidade ao cisalhamento não pode ser efetivamente aumentada próximo à região do apoio da unidade alveolar, especialmente se essa região estiver fissurada por conta da flexão, causando um mecanismo final de falha de ancoragem. Também podendo ser observado um esmagamento do concreto na borda superior da laje.

### 2.1.2. Tensão por tração diagonal

Para o caso das lajes de maior altura com aplicação da força a 2,5h em relação ao apoio, a pesquisa desenvolvida em [1] concluiu que houve uma mudança no mecanismo de ruptura causando uma tensão por tração diagonal, sendo identificada maior influência do cisalhamento e rompendo de forma mais brusca. Os mecanismos típicos de comportamento presentes em peças de maiores alturas, quando estas se encontram próximas ao colapso, podem ser observados na Figura 4.

### 2.1.3. Falha de ancoragem

De acordo com [4], se em algum lugar ao longo do comprimento de transferência aparecer uma fissura de flexão, dificilmente será possível aumentar a tensão no aço, devido ao estado limite de equilíbrio que existe nessa área.

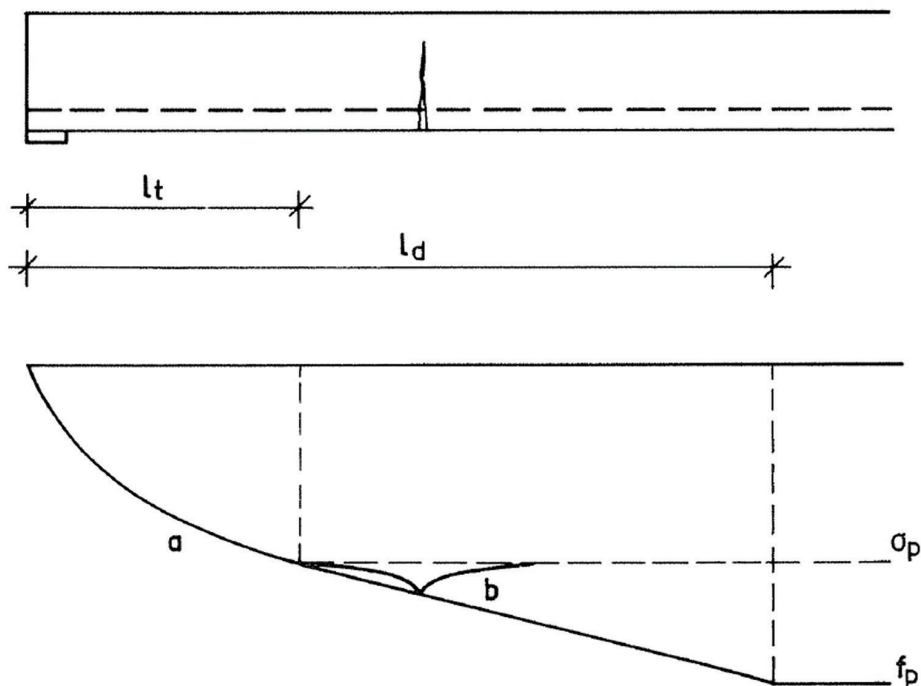
Se a fissura ocorre fora do comprimento de transferência, é possível um aumento na tensão no aço. Em ambos os lados da fissura essa tensão é aumentada além de um determinado comprimento que é suficiente para transmitir força adicional nas barras devida à fissuração, pela tensão de aderência do concreto. Entretanto se a tensão elevada devida à fissura é muito grande, a zona afetada (região b, na Figura 5) invade a região de ancoragem (região a, na Figura 5) e o equilíbrio da zona de transferência é perturbado, possibilitando o escorregamento das cordoalhas. Se a distância da extremidade do elemento é grande o suficiente, a tensão última nas cordoalhas pode ser alcançada. Essa distância é denominada de comprimento de desenvolvimento ( $l_d$ ).

## 2.2. Principais pesquisas realizadas

Inicialmente em [6] são descritos procedimentos para a realização de um ensaio padrão com o intuito de avaliar a resistência ao esforço cortante, com base nas recomendações da FIB. Além disso, o autor apresenta uma discussão de como aplicar estes procedimentos em ambiente fabril, sugerindo a padronização destes ensaios no Brasil.



**Figura 4:** Mecanismos de comportamento para lajes de maior altura.  
Fonte: Bertagnoli & Mancini (2009) *apud* [1].



**Figura 5:** Situação crítica de fissuração em relação a falha de ancoragem.  
Fonte:[4].

Na pesquisa realizada em [7] são propostas recomendações e adequações para a realização de procedimentos experimentais em lajes alveolares, com base em bibliografias internacionais, abordando aspectos como ensaios para pesquisa, controle de qualidade e avaliação de desempenho. Vale ressaltar que no período de desenvolvimento da referida pesquisa, a norma brasileira NBR 14861 [8] encontrava-se em revisão, e a sua versão atual para época apresentava apenas aspectos gerais do produto.

Em [1] foi analisado o comportamento quanto ao cisalhamento em região fissurada por flexão em lajes alveolares protendidas comumente utilizadas no Brasil, que são caracterizadas com uma pequena altura (lajes baixas), elevado nível de protensão e com a consideração da presença ou não de capa e de alvéolos preenchidos.



Figura 6: Modos de ruptura para lajes baixas versus lajes altas [12].

Posteriormente, em [5] foram apresentados os principais mecanismos condicionantes à ruptura por força cortante em lajes alveolares, sendo eles a flexo-cortante e a tração diagonal. Ademais, foi proposto um coeficiente que considera de forma indireta a influência dos esforços cisalhantes devido a introdução da protensão no elemento. A partir da análise de ensaios experimentais considerando o coeficiente proposto, o autor concluiu que os modelos de cálculo modificados apresentaram melhoras significativas.

A pesquisa desenvolvida em [9] apresenta uma análise de cada processo individual a respeito da linha de produção das lajes alveolares, desde a entrada dos insumos em fábrica até o capeamento no canteiro de obras. Para cada etapa do processo é feita uma lista detalhada de forma simples e prática dos procedimentos de controle de qualidade, com o intuito de obter um guia de boas práticas para a produção das mesmas.

Em [10], foi estudada a influência da geometria dos alvéolos na capacidade resistente ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas considerando o mecanismo de ruptura por tração diagonal. Em [11] foram mencionados alguns dos fatores que influenciam na resistência à força cortante de lajes alveolares e que, por sua vez, geram incertezas. Tais fatores podem ser descritos como perda de protensão, comprimento de transferência de protensão, posição da seção crítica de ruptura, altura da laje e a forma dos alvéolos. O autor avaliou a influência de todas estas variáveis por meio de ensaios experimentais e modelagem computacional.

Os trabalhos supracitados foram desenvolvidos no NETPre e, de acordo com [12], tais pesquisas demonstraram que lajes alveolares maiores que 260 mm de altura (lajes altas) tendem a falhar por tração diagonal, e lajes menores que 200 mm (lajes baixas) tendem a falhar pela interação de flexão e cisalhamento. Figura 6.

Conforme apresentado em [13], os dois modos de ruptura consagrados no meio acadêmico são: tração diagonal e flexo-cortante. A ruptura por tração diagonal refere-se ao cisalhamento em regiões com baixa ou nenhuma interferência de flexão, na qual os modelos analíticos são embasados na teoria da resistência dos materiais. Já o modo de ruptura flexo-cortante ocorre em regiões onde há interferência da flexão, que por se tratar de uma complexa interação, os modelos analíticos normalmente são fundamentados em princípios teóricos e ajustados experimentalmente. Em [7], é demonstrado de forma mais detalhada os modos de rupturas conhecidos no meio acadêmico.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os resultados que serão apresentados tratam-se da comparação entre dois relatórios técnicos de avaliação de desempenho estrutural realizados pelo laboratório NETPre. Em [14] foram realizados ensaios em lajes altas de 300 mm de altura e em [15] foram analisadas experimentalmente lajes baixas de 200 mm de altura.

#### 3.1. Caracterização das lajes

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram analisados ensaios destrutivos em 06 protótipos de lajes (sendo 03 com altura de 200 mm e 03 com altura de 300 mm) com 6 m de comprimento cada, com aplicação de uma carga concentrada até a ruptura para avaliação da resistência à força cortante última. Para isso, foi empregado um procedimento padronizado de ensaio conforme a norma europeia EN-1168 [16], que por sua vez, foi usada como referência para a revisão da norma Brasileira de lajes alveolares NBR-14861[17].

As lajes altas apresentaram as seguintes características: 300 mm de altura, 1245 mm de largura,  $f_{ck}$  de 40 Mpa, fabricação por meio de máquina moldadora, 6000 mm de comprimento e configuração da armadura



**Figura 7:** Posição das cordoalhas: (a) para laje de 300 mm, (b) para laje de 200 mm [15].  
Fonte: [14].

ativa de 11 × 12,7 mm com protensão inicial de 145 kN por cabo, resultando na tensão  $\sigma_p = 1430$  MPa. Foram ensaiadas 03 lajes denominadas: LA\_H30-1, LA\_H30-2 e LA\_H30-3.

As lajes baixas apresentaram as seguintes características: 200 mm de altura, 1245 mm de largura, 6000 mm de comprimento, fabricação por meio de máquina moldadora,  $f_{ck}$  de 45 MPa e armadura ativa na configuração 6 × 9,5 mm, cordoalhas com protensão inicial de 80 kN por cabo, resultando na tensão  $\sigma_p = 1441$  MPa. As lajes ensaiadas foram denominadas de LA\_H20-4 e LA\_H20-5 e LA\_H20-6.

Para garantir melhor análise dos mecanismos de ruptura foi necessário realizar a verificação do escorregamento das cordoalhas, inicialmente por meio de uma identificação visual e posteriormente por meio da medição do afundamento médio  $\Delta_{Lo}$  (valor médio entre cordoalhas) com o auxílio de um paquímetro, bem como do valor máximo de escorregamento em uma cordoalha ( $\Delta_{Lo,max}$ ), dados pela NBR14861 [17] de acordo com as expressões:

$$\Delta_{Lo} = 0,4 \times 85\varphi \times \sigma_{po} / E_p \tag{1}$$

$$\Delta_{Lo,lim} = 1,3\Delta_{Lo} \tag{2}$$

Sendo:

$\varphi$ : diâmetro da cordoalha em mm;

$\sigma_{po}$ : tensão de protensão inicial;

$E_p$ : módulo de elasticidade da armadura ativa.

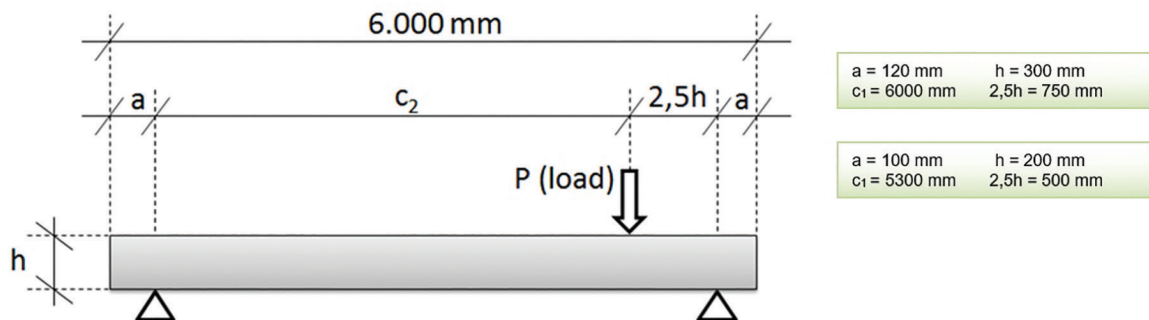
Considerou-se ainda, para fins da medição uma tolerância de 1 mm;

Para facilitar este procedimento, as cordoalhas foram numeradas da esquerda para direita conforme ilustrado na Figura 7.

### 3.2. Descrição dos ensaios

O ensaio de cisalhamento é utilizado para avaliar a resistência aos esforços cortantes, sendo a resistência ao cisalhamento diretamente influenciada pela resistência do concreto à tração, uma vez que este tipo de laje não possui armadura transversal. A resistência ao cisalhamento também é influenciada por fatores como: formato geométrico dos alvéolos, dosagem do concreto e processo de fabricação. O ensaio padrão de cisalhamento é proveniente do manual FIP [18] e da norma europeia EN 1168 [16].

Os esquemas dos ensaios empregados para a avaliação das lajes em estudo podem ser observados na Figura 8.



**Figura 8:** Arranjo dos Ensaios para Resistência à Força Cortante em Lajes Alveolares.

O ensaio ocorreu conforme preconiza [18] e [16], para a situação bi apoiada, com apoios móveis para que não gerassem esforços axiais provenientes das restrições nos apoios. Para compensar possíveis irregularidades e curvaturas na direção transversal da peça foi utilizada madeira entre a laje e a viga de suporte. A força foi aplicada por meio de atuador hidráulico com célula de carga para leitura da intensidade das forças a uma distância de 2,5 vezes a altura do elemento ensaiado.

Para aceitação, os resultados experimentais obtidos foram comparados com valores teóricos de cálculo empregando os critérios recomendados por [16]. Tais critérios de aceitação preconizam que os resultados experimentais devam ser superiores aos valores teóricos previstos, com condição de aceitação  $V_{test} / V_{calc} \geq 0,95$  para cada ensaio e  $V_{test} / V_{calc} \geq 1,00$  para o valor médio de 3 ensaios, sendo  $V_{calc}$  a força cortante última calculada para cada elemento e  $V_{test}$  a força cortante última obtida no ensaio de cada elemento.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Na Figura 9 é possível observar a vista dos ensaios de cisalhamento para a laje de 300 mm de altura e para a laje de 200 mm de altura.

##### 4.1. Análise dos resultados experimentais de força versus deslocamento

Os gráficos que representam a curvatura de Força  $\times$  Deslocamento obtidos durante os ensaios são apresentados da Figura 10 até a Figura 12.



Figura 9: Vista dos Ensaios de Cisalhamento: (a) laje de 300 mm de altura [14], (b) laje de 200 mm de altura [15].

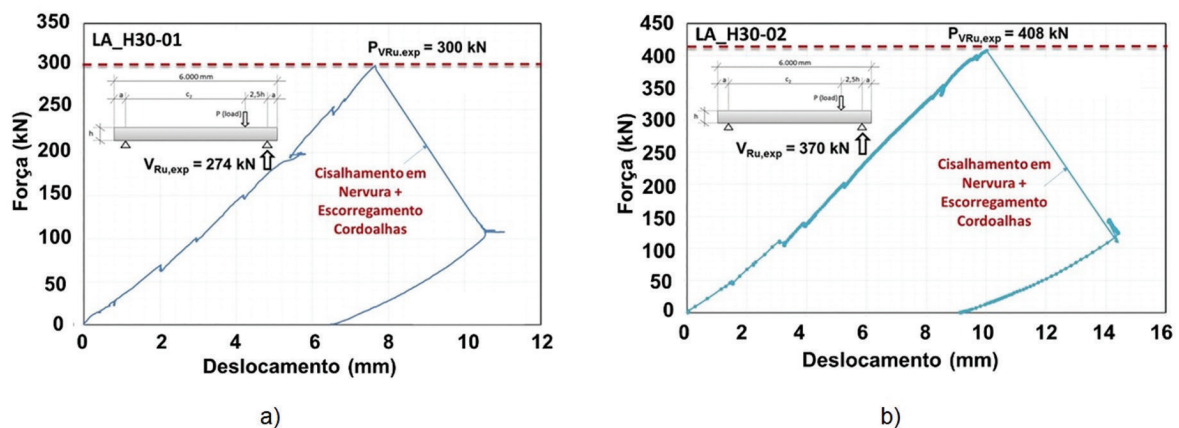


Figura 10: Gráfico Força no Atuador  $\times$  Deslocamento: (a) LA\_H30-1, (b) LA\_H30-2 [14].

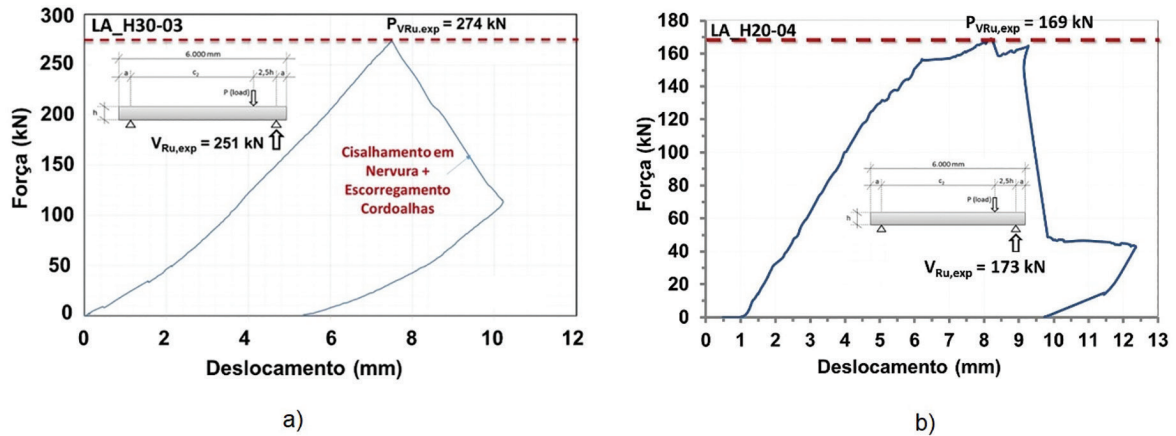


Figura 11: Gráfico Força no Atuador × Deslocamento. (a) LA\_H30-3 [14], (b) LA\_H20-4 [15].

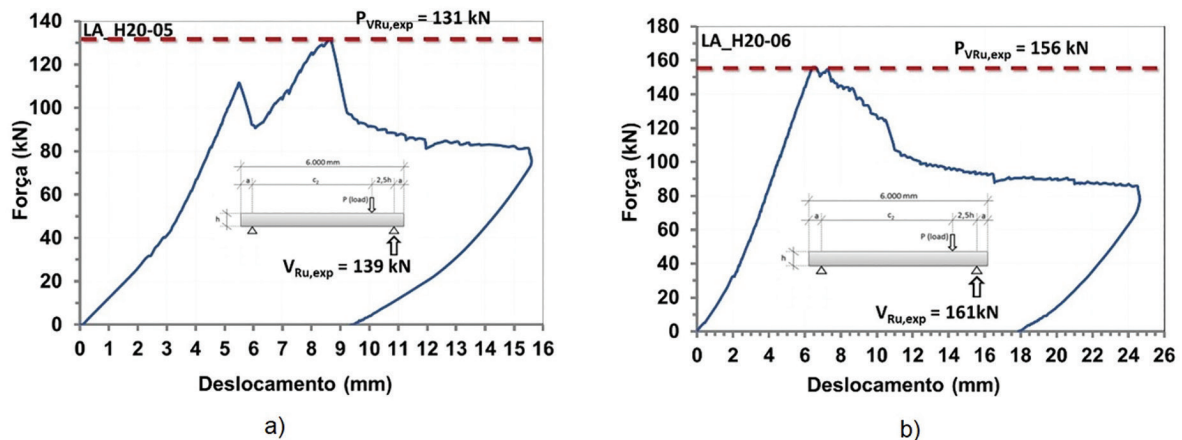


Figura 12: Gráfico Força no Atuador × Deslocamento. (a) LA\_H20-5, (b) LA\_H20-6 [15].

O comportamento das lajes LA\_H30-01, LA\_H30-02 e LA\_H30-03 ilustradas nas Figura 10 e na Figura 11(a), foram semelhantes, a partir da mesma tipologia de curva força versus deslocamento, que apresentou um aumento contínuo da resistência à força cortante variando de 251 kN a 370 kN, seguido de uma queda brusca repentina. A partir da configuração das curvas é possível observar que o mecanismo resistente predominante correspondeu ao cisalhamento.

No caso das lajes LA\_H20-04, LA\_H20-05 e LA\_H20-06 pode-se notar um comportamento diferente das lajes mais altas, mas semelhantes entre si, conforme ilustrado na Figura 11(b) e na Figura 12. As lajes alcançaram resistências à força cortante variando de 139 kN a 173 kN, e mesmo após queda de resistência a laje ainda foi capaz de manter mecanismos resistentes antes da ruptura. Nesse caso, o mecanismo de ruptura não é bem definido (como no caso anterior), havendo uma interação de mecanismos.

Na Tabela 1 é possível observar a comparação entre os resultados experimentais e teóricos das cargas críticas aplicadas no atuador hidráulico para obtenção do máximo esforço cortante resistente na seção. Analisando os resultados pode-se notar que as resistências experimentais foram superiores aos valores teóricos previstos, respeitando os critérios de aceitação. Portanto, o requisito de desempenho para a resistência à força cortante foi satisfatório em todos os modelos apresentados. Além disso, a segurança dos dados é garantida uma vez que todos os valores para a relação  $V_{u,exp} / V_{R,teor}$  foram superiores a 1,0.

#### 4.2. Mecanismos de funcionamento próximo ao colapso

As configurações de fissuração das lajes de 300 mm podem ser observadas nas Figuras 13 a 15.

Todas as lajes de 300 mm de altura apresentaram um mecanismo bem definido quanto ao cisalhamento, sendo a ruptura brusca com estrondo e aparecimento de fissura inclinada típica, que se estendeu do apoio ao ponto de aplicação da força. Na Figura 16 pode-se observar que as lajes de 300 mm de altura apresentaram na ruína, além do cisalhamento da nervura, também o fendilhamento do concreto na posição da cordoalha devido



Tabela 1: Comparação de Resultados Experimentais e Valores Teóricos calculados de acordo com [15].

Laje Ensaçada	$P_{VRu,exp}$ (kN)	$V_{Ru,exp}$ (kN)	$V_{R,teor}$ (NBR14861) (kN)	$V_{Ru,exp} / V_{R,teor}$
LA_H30-01	300	274	238	1,15
LA_H30-02	408	370	238	1,56
LA_H30-03	274	251	238	1,06
LA_H20-04	169	173	131	1,32
LA_H20-05	131	139	131	1,06
LA_H20-06	156	161	131	1,23

$P_{VRu,exp}$ : máxima força aplicada pelo atuador durante o ensaio;  $V_{Ru,exp}$ : capacidade última experimental;  
 $V_{R,teor}$ : resistência teórica máxima prevista com  $\gamma_c = 1$ .

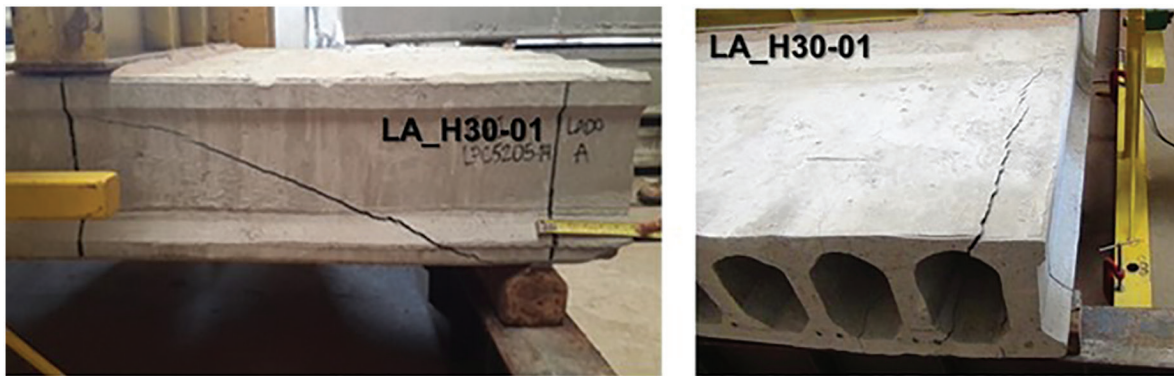


Figura 13: Ruptura por cisalhamento da nervura LA\_H30-01 [14].



Figura 14: Ruptura por cisalhamento da nervura LA\_H30-02 [14].



Figura 15: Ruptura por cisalhamento da nervura LA H30-03 [14].

ao seu escorregamento (falha de ancoragem). Além disso, pode-se notar a presença da delaminação que corresponde ao destacamento ou separação de uma camada de concreto próximo à superfície.

As lajes de 300 mm de altura apresentaram comportamento próximo à ruína semelhante ao descrito em [1] para lajes mais altas, evidenciando que lajes com alturas maiores que 200 mm apresentam menor influência

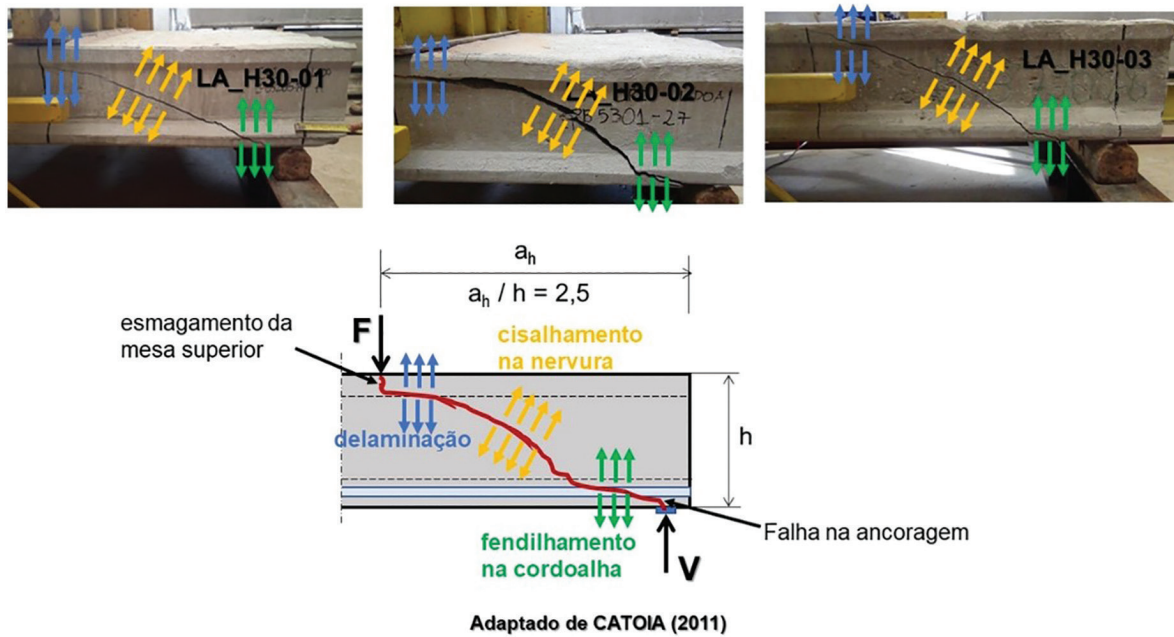


Figura 16: Mecanismos de funcionamento para lajes de 300 mm de altura.



Figura 17: Ruptura por cisalhamento com flexão e falha de ancoragem – LA\_H20-04 [15].

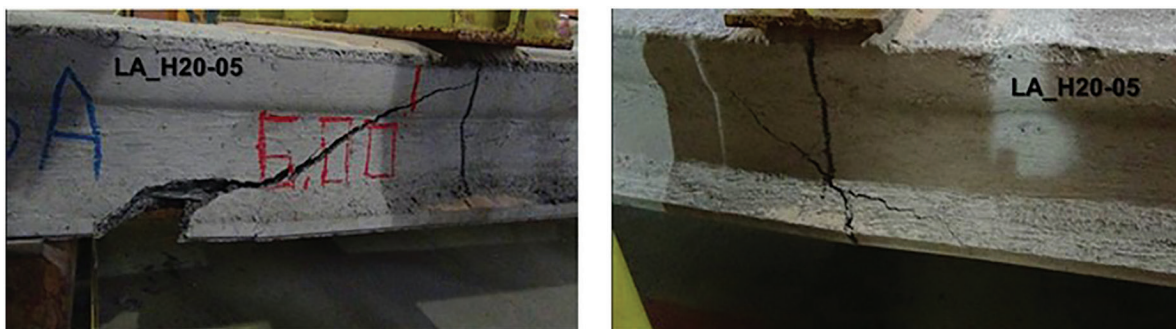


Figura 18: Ruptura por cisalhamento com flexão e falha de ancoragem – LA\_H20-05 [15].

da flexão nos mecanismos de funcionamento, sendo capaz de desenvolver maiores resistências à força cortante e apresentar configuração de fissuração e falha nitidamente diferente das lajes menores.

Assim, analisando todos os casos, pode-se dizer, corroborando o afirmado em [1], que com o aumento da altura da laje, tem-se menor influência da flexão, com a presença de um mecanismo mais bem definido quanto ao cisalhamento e a tendência de uma ruptura frágil.

Nas Figuras 17 a 19 são apresentadas as configurações de fissuração das lajes de 200 mm de altura.

A partir da análise da configuração da fissuração próxima à ruína das peças com altura de 200 mm foi possível evidenciar comportamento similar ao descrito em [1] para lajes baixas, sendo notória a grande



Figura 19: Ruptura por cisalhamento e flexão com falha de ancoragem – LA\_H20-06 [15].

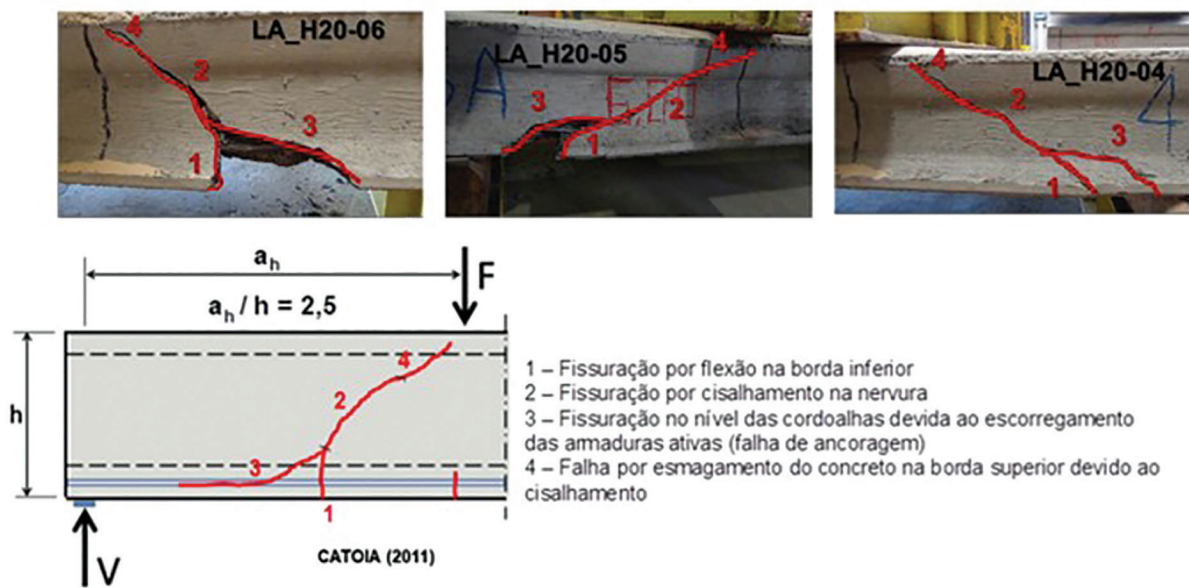


Figura 20: Mecanismos de funcionamento para lajes de 200 mm de altura.

Tabela 2: Determinação dos limites para o afundamento das cordoalhas de acordo com [17].

Laje Ensaçada	$\phi$ (mm)	$\sigma_{po}$ (MPa)	$\Delta_{Lo}$ (mm)	$\Delta_{Lo,lim}$ (mm)
LA_H30-01	12,7	1430	3,0	3,9
LA_H30-02				
LA_H30-03				
LA_H20-04	9,5	1441	2,3	3,0
LA_H20-05				
LA_H20-06				
Equações	$\Delta_{Lo} = 0,4 \times 85\phi \times \sigma_{po} / E_p \quad \Delta_{Lo,lim} = 1,3\Delta_{Lo} \quad \text{com } E_p = 200 \text{ kN/mm}^2$			

influência das fissuras de flexão na capacidade resistente ao cisalhamento, como pode ser observado na Figura 20.

Da mesma forma, as lajes de 200 mm ensaiadas com aplicação da força a 2,5 h em relação ao apoio se comportaram como as lajes baixas descritas em [1], como pode ser observado na Figura 20.

### 4.3. Análise do afundamento das cordoalhas

A partir das equações (1) e (2) recomendadas pela NBR 14861 [17], é possível determinar o valor médio permitido para o afundamento entre as cordoalhas ( $\Delta_{Lo}$ ) e o valor máximo de escorregamento em uma cordoalha ( $\Delta_{Lo,máx}$ ), como pode ser observado na Tabela 2.

A seguir nas Figuras 21 a 23 são apresentados os gráficos com os escorregamentos das cordoalhas medidos em cada laje antes e depois dos ensaios, com as indicações dos limites determinados de acordo com [17].

Considerando uma inspeção inicial visual juntamente com a análise dos gráficos referentes aos escorregamentos medidos, pode-se afirmar que as lajes não apresentaram problemas sistêmicos com relação à fissuração do concreto, principalmente que estivessem relacionados com problemas de fendilhamento na região da

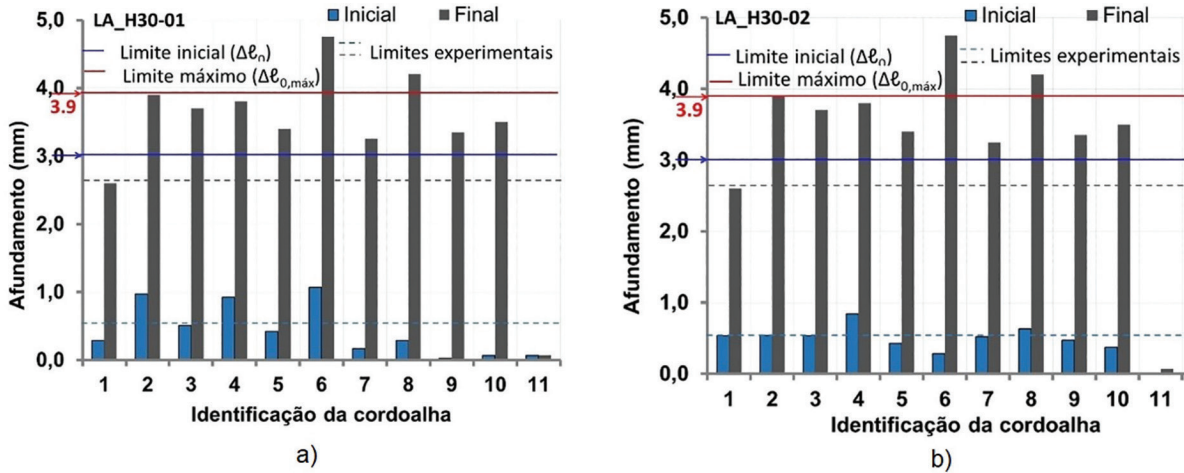


Figura 21: Escorregamento de cordoalhas: (a) para LA\_H30-01, (b) para LA\_H30-02 [14].

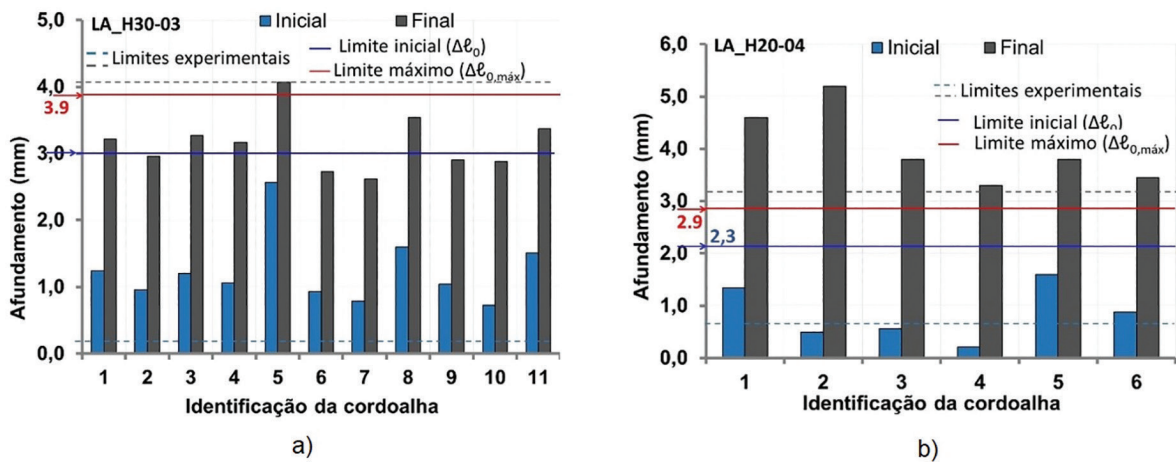


Figura 22: Escorregamento de cordoalhas: (a) para LA\_H30-03 [14], (b) para LA\_H20-04 [15].

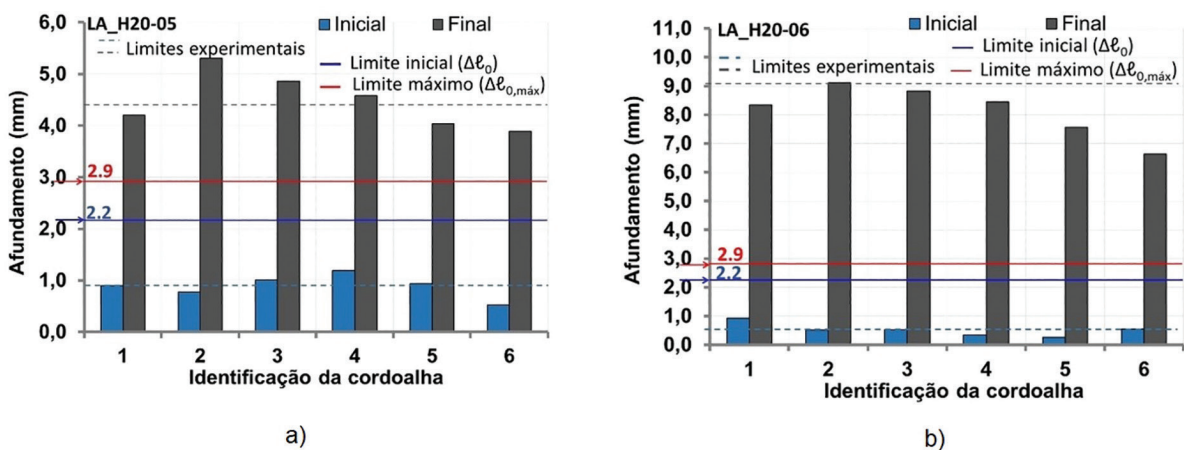


Figura 23: Escorregamento de cordoalhas: (a) para LA\_H20-05, (b) para LA\_H20-06 [15].

cordoalha ou mesmo nas nervuras da laje próximo ao apoio, de forma que pudessem causar o comprometimento estrutural previamente aos ensaios.

De acordo com os gráficos ilustrados nas Figuras 21 a 23, foram observados escorregamentos máximos superiores aos limites estabelecidos por [17] apenas após a ruptura das lajes e finalização do ensaio, ou seja, somente após a contribuição de diversos mecanismos resultando no esgotamento total da capacidade resistente dos elementos.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nas comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e os valores teóricos considerando os ensaios de cisalhamento, todas as lajes ensaiadas apresentaram segurança e bom desempenho estrutural, uma vez que todos os ensaios realizados estão de acordo com os critérios de cálculo adotados na NBR14861 de 2011. Esta mesma norma tem por referência para ensaios em lajes alveolares as recomendações técnicas da norma europeia EN1168 de 2009 e outras referências técnicas da Comissão Internacional para Lajes Alveolares da FIB-C6.1, os quais serviram como base para os procedimentos empregados no NETPRE-UFSCar.

As lajes foram caracterizadas de acordo com a espessura, formato dos alvéolos, força de protensão aplicada e processo de fabricação, estes fatores aliados aos ensaios experimentais auxiliam no desenvolvimento de critérios de cálculo mais precisos para resistência ao cisalhamento e de fatores que levam aos mecanismos de ruptura em lajes alveolares quanto ao cisalhamento, por estas não possuírem armadura transversal e devido à quantidade de variáveis envolvidas: resistência à tração do concreto, taxa de armadura longitudinal, fator escala, esforço axial da protensão e tipo de agregado.

Além disso, analisando os resultados e comportamento das peças próximo a ruína, pode-se concluir que tanto as lajes de 300 mm como as de 200 mm apresentaram boa eficiência de ancoragem. De fato, o escorregamento das cordoalhas somente ocorreu após a ruptura por cisalhamento em região fissurada por flexão (*flexure shear mechanism*) de acordo com o critério de cálculo adotado na NBR14861.

A partir das análises dos mecanismos resistentes pode-se concluir que as lajes de 200 mm apresentaram maior influência do mecanismo de flexão o que resultou em maior deformabilidade do elemento para valores menores de força em comparação com as lajes mais altas. Além disso, observou-se que mesmo com queda da resistência à força cortante a laje foi capaz de manter parte da força aplicada antes do colapso.

Os ensaios realizados aumentam evidências da caracterização dos modos de ruptura consagrados em meio acadêmico, de tração diagonal e flexo-cortante, onde ocorrem modos de ruptura caracterizadamente diferentes em lajes de alturas diferentes, dividindo-se em lajes altas e lajes baixas. No caso das lajes de 300 mm o mecanismo de ruptura quanto ao cisalhamento foi bem definido com ruptura brusca e aparecimento de fissura inclinada típica com extensão do apoio ao ponto de aplicação da força e apresentaram cisalhamento da nervura e fendilhamento do concreto na posição da cordoalha devido à falha de ancoragem, com presença de delaminação da camada de concreto próxima à superfície. Foi notado também uma menor influência da flexão nos mecanismos de funcionamento, proporcionando maiores resistências à força cortante. Dessa forma, conclui-se que assim como mencionado em [1] lajes com alturas maiores de 200 mm e nível de protensão variando de 1140 MPa a 1460 MPa tendem a apresentar ruptura por cisalhamento da nervura.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] CATOIA, B., *Lajes alveolares protendidas: Cisalhamento em região fissurada por flexão*. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- [2] PAJARI, M., *Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure*. Espoo: VTT, 2005.
- [3] FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTÉ (FIP). *Precast Prestressed Hollow Core Floors*. Telford: FIP, 1988.
- [4] WALRAVEN, J.C., MERCX, W.P.M., “The bearing capacity of prestressed hollow core slabs”, *HERON*, v. 28, n. 3, 1983.
- [5] MARQUESI, M.L.G., *Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em lajes alveolares protendidas*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.
- [6] FERNANDES, N.S., *Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido: Ensaio padrão de apoio para controle de qualidade*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
- [7] COSTA, O.O., *Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricada*. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Laje pré-fabricada – painel alveolar de concreto protendido – Requisitos. NBR 14861*. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- [9] DIREITINHO, R.M.L.C., *Diretrizes para práticas de qualidade nas diferentes etapas do processo de produção de lajes alveolares de concreto protendido*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- [10] MACIEL, A., *Influência da variação da geometria dos alvéolos na capacidade resistente ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- [11] SALES, M.W.R., *Estudo numérico-experimental da influência dos mecanismos na resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- [12] FERREIRA, M.A., “Avanços na pesquisa em lajes alveolares protendidas: mecanismos de resistência ao cisalhamento”, *ABCIC*, 2021. <https://www.abcic.org.br/Arquivos/ctlv12mg.pdf>.
- [13] MACIEL, A.M., CARVALHO, R.C., FERREIRA, M.A., *et al.*, “Avanços dos estudos da capacidade resistente à força cortante em lajes alveolares protendidas”, *Interação – Revista De Ensino, Pesquisa E Extensão*, v. 18, n. 3. pp. 18–37, 2016. <https://doi.org/10.33836/interacao.v18i3.100>
- [14] FERREIRA, M.A., CATOIA, B., *RT1399-12/LA2015-07: Avaliação do Desempenho Estrutural de Lajes Alveolares Protendidas em Concreto Pré-Moldado Protendido*. São Carlos: Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto, 2015.
- [15] FERREIRA, M.A., BACHEGA, L., *RT1399-12/LA2014-06: Avaliação do Desempenho Estrutural de Lajes Alveolares Protendidas em Concreto Pré-Moldado Protendido*. São Carlos: Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto, 2014.
- [16] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). *Precast concrete products – Hollow core slabs. EN 1168*. Brussels: CEN, 2005.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos. NBR 14861*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- [18] FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE (FIP). *Quality Assurance of Hollow core Slab*. London: FIP, 1992.